第 36 卷 第 4 期
2016 年 8 月
中国腐蚀与防护学报
Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection
Vol.36 No.4
Aug. 2016

# 库尔勒土壤模拟溶液中形成的腐蚀产物膜对X80钢点蚀行为的影响

张 弟[1] 梁 平[1] 张云霞[2] 史艳华[1] 秦 华[1]

1. 辽宁石油化工大学机械工程学院 抚顺 113001;
2. 辽宁石油化工大学继续教育学院 抚顺 113001

**摘要:** 通过浸泡实验研究了不同浸泡时间下X80管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中形成的腐蚀产物膜的变化规律,通过SEM观察了腐蚀产物膜的微观形貌,通过XRD分析了腐蚀产物膜的物相组成;借助循环极化曲线和电化学阻抗等方法,研究了腐蚀产物膜对X80管线钢点蚀行为的影响规律和机理。结果表明:随着浸泡时间的延长,X80管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中形成的腐蚀产物膜逐渐增厚,致密性逐渐提高。当浸泡时间达到168 h以后,腐蚀产物膜明显地分为了内外两层。表面存在的腐蚀产物膜可以阻碍或抑制X80管线钢的点蚀行为,这主要是因为表面腐蚀产物膜减少了蚀孔萌生的几率,增大了蚀孔长大的阻力。

**关键词:** 腐蚀产物膜 点蚀 循环极化 X80管线钢

**中图分类号:** TG174.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-4537(2016)04-0313-08

# Effect of Corrosion Product Film Formed in Artificial Solution Simulated Soil Medium at Ku'erle Area on Pitting Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel

ZHANG Di[1], LIANG Ping[1], ZHANG Yunxia[2], SHI Yanhua[1], QIN Hua[1]

*1. School of Mechanical Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;*
*2. Continual Education Institute, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China*

**Abstract:** The evolution of corrosion product film formed on X80 pipeline steel in artificial solution, which simulate the soil medium at Ku'erle area, with different immersion time was studied by immersion tests, while the morphology and phase constituent of the corrosion product film was characterized by means of scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction (XRD) respectively. The effect of corrosion product film on the pitting corrosion of X80 pipeline steel was investigated by cyclic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The experimental results showed that the thickness and compactness of corrosion product film gradually increased with increasing immersion time. After immersion for 168 h, the corrosion product film was clearly divided into two layers. The pitting of X80 pipeline steel may be hindered or inhibited by the corrosion product film, which may reduce the probability of pitting initiation, and increase the resistance to pitting growth.

**Key words:** corrosion product film, pitting corrosion, cyclic polarization, X80 pipeline steel

**定稿日期:** 2015-09-06

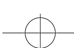
**基金项目:** 辽宁省教育厅2012年科学研究一般项目 (L2012127) 和2013年度辽宁省普通本科高等学校实验教学示范中心建设项目资助

**作者简介:** 张弟,女,1990年生,硕士生

**通讯作者:** 梁平,E-mail: liangping770101@163.com,研究方向为材料的腐蚀行为和防护技术

DOI: 10.11902/1005.4537.2015.151





## 1 前言

近年来,我国石油和天然气的开发得到迅速发展。管道是输送油气的有效方式,管道的安全运行对石油和天然气的远距离输送具有十分重要的意义[1]。我国在西气东输管线二线工程中开始大规模使用X80管线钢,这种管道一旦因腐蚀而发生破坏,将会造成巨大的经济损失并可能产生环境污染及造成人身伤害。因此,开展X80管线钢在我国典型土壤中的腐蚀行为研究是必要的。

新疆库尔勒地区埋设着大量天然气管线,该地区土壤是我国西部荒漠盐渍土壤的典型代表,土壤呈碱性,含盐量较高[2],对管线钢的腐蚀性较大。点蚀是管线钢失效的主要形式之一[3,4],产生的蚀孔有可能造成天然气泄漏,也可能成为土壤应力腐蚀裂纹萌生的起源[5],Liang等[6]研究表明,X80管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中形成的蚀孔为应力腐蚀开裂提供了源头。因此,点蚀是管线钢在实际运行过程中需要重点防范的局部腐蚀形式。管线在运行过程中难免会因内在或外在因素而导致涂层局部发生破裂,从而使管线钢表面形成锈层,而锈层的存在将改变材料的电化学腐蚀行为,有关这方面的研究已有相关文献报道。如胡家元等[7]研究认为:碳钢在海水及海水淡化一级反渗透 (RO) 产水中形成的锈层在结构、成分及功能上具有显著的差异。海水淡化一级RO产水中,锈层对碳钢的腐蚀起到促进作用,而在海水中,锈层则起到抑制作用;阳靖峰等[8]认为,在pH值为9和10的溶液中,表面腐蚀产物使低碳钢钝化,腐蚀产物覆盖的低碳钢比裸低碳钢更容易发生钝化;本课题组[9]研究表明,在酸性土壤环境中形成的腐蚀产物膜促进了X80管线钢的进一步腐蚀。可见,目前的研究大多集中于锈层对材料全面腐蚀行为的影响,而有关腐蚀产物膜对管线钢点蚀行为产生何种影响的研究还很少看到相关文献报道。因此,本文通过浸泡实验、循环极化、电化学阻抗等测试方法,研究了腐蚀产物膜覆盖下的X80管线钢的点蚀行为,考察了腐蚀产物膜对点蚀敏感性的影响规律,分析了影响机制。

## 2 实验方法

### 2.1 实验材料及腐蚀介质

选取西气东输现场使用的X80管线钢为实验材料,其化学成分 (质量分数,%) 为:C 0.043,Si 0.230,Mn 1.870,S 0.003,P 0.010,Cr 0.025,Mo 0.270,V 0.006,Ti 0.017,Cu 0.130,Nb 0.060,Al 0.042,Ni 0.230,Fe余量。尺寸为10 mm×10 mm×5 mm的正方形X80管线钢为工作电极,试样背面引出Cu导线,用环氧树脂将其包封在聚四氟乙烯中。实验前,将封好的电化学试样用砂纸从180#逐级打磨至1500#,然后用无水乙醇和去离子水清洗吹干后放入干燥器中进行干燥,待测试使用。

以库尔勒土壤为研究背景,根据土壤理化性质配制土壤模拟溶液,其化学组成 (g/L) 为:$NaHCO_3$ 0.1462,$KNO_3$ 0.2156,$Na_2SO_4$ 2.5276,$CaCl_2$ 0.2442,NaCl 3.1707,$MgCl_2·6H_2O$ 0.6699。用分析纯化学试剂和去离子水配制土壤模拟溶液,用质量分数为5%的NaOH溶液调节库尔勒土壤模拟溶液的pH值为9.10。由于在库尔勒土壤模拟溶液中形成点蚀的过程较为缓慢,因此,为了加速点蚀的发生过程,实验室选用0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl溶液作为点蚀实验的腐蚀介质。

### 2.2 浸泡实验

为了使X80管线钢表面生成腐蚀产物膜,将打磨后的X80管线钢试样放入库尔勒土壤模拟溶液中,浸泡6,12,24,168,504和1008 h,温度恒定在25 ℃。到达指定时间后取出腐蚀试样,吹风机吹干,对形貌进行宏观和微观观察。

### 2.3 电化学测试

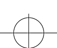
电化学测试由2273电化学测试系统完成。测试时采用三电极体系,表面没有腐蚀产物膜的X80钢和表面带有腐蚀产物膜的X80钢分别为工作电极,Pt片为辅助电极,饱和甘汞电极 (SCE) 为参比电极,文中所有电位均相对于SCE而言。

将不同浸泡时间下的X80管线钢 (表面带有腐蚀产物膜) 在0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl溶液中进行循环阳极极化曲线测试,测试先从稳定电势开始以1 mV/s的扫描速率向阳极方向扫描,当达到指定的电流密度时,以同样的扫描速率进行回扫。环形曲线的面积由方格法近似求出[10]。

将不同浸泡时间下的X80管线钢在0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl溶液中进行电化学阻抗测试,测试在自腐蚀电位 ($E_{corr}$) 下进行,交流扰动电压幅值为10 mV,测量频率范围为$10^5$~$10^{-2}$ Hz,采用ZSimpWin阻抗分析软件对电化学阻抗数据进行数值拟合。

### 2.4 微观形貌观察和能谱分析

采用TESCAN VEGA3SBH型扫描电子显微镜 (SEM) 观察腐蚀产物膜的微观形貌,并采用BRUKER 129 eV能谱仪 (EDS) 测试元素组成;用小刀将外层红色和内层黑色的腐蚀产物刮下,烘干研磨后,



通过X-7000型X射线衍射仪 (XRD) 分析产物膜的物相组成。

## 3 结果与讨论

### 3.1 不同浸泡时间下腐蚀产物膜的宏观形貌

图1为X80管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡不同时间后表面形成的腐蚀产物膜的宏观形貌。可以看出，当试样腐蚀6 h时，X80管线钢表面形成了一层较薄的呈浅黄色的腐蚀产物膜；随着浸泡时间的延长，X80管线钢表面腐蚀产物膜的颜色逐渐加深，腐蚀区域面积不断增大，红色锈层逐渐增厚；浸泡时间达到168 h之后，腐蚀产物膜的厚度增大，且黑色内层产物越来越明显。

### 3.2 不同浸泡时间下腐蚀产物膜的微观形貌和物相组成分析

图2为X80管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡不同时间后表面形成的腐蚀产物膜的SEM像和EDS结果。可以看出，当X80管线钢试样在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡6 h时，表面形成的腐蚀产物膜较为疏松，产物膜表面存在大量微小孔洞等缺陷，且由于腐蚀产物膜相对较薄，产物膜也较为平坦 (图2a)；当浸泡时间延长到24 h，腐蚀产物膜逐渐变得致密，但缺陷仍然存在 (图2b)；当浸泡时间达到96 h时，腐蚀产物膜由于厚度不断增加，局部出现脱落导致腐蚀产物膜的高度出现差异，产物膜不再平坦 (图2c)；当浸泡时间达到168 h时，产物膜的分层现象已经很明显，外层疏松易脱落，缺陷较多 (图2d)，内层致密平坦，缺陷相对较少 (图2e)。

对不同浸泡时间下的腐蚀产物膜进行EDS测试 (图2f)，分析表明，产物膜主要由Fe，O和Cl组成。Fe和O是锈蚀产物，而Cl则主要来自于库尔勒土壤溶液。

图3为腐蚀168 h后，X80管线钢表面外层和内层产物膜的XRD谱。分析表明，外层产物主要以$Fe_2O_3$和FeOOH为主，而内层产物主要以$Fe_3O_4$为主。

### 3.3 不同浸泡时间下的循环极化曲线

循环阳极极化曲线是研究点蚀的一种有效方法，可通过该曲线上的击穿电位$E_b$、保护电位$E_p$及滞后环面积$S$来评价材料的抗点蚀性能。一般来说，$E_b$和$E_p$越正，材料的抗点蚀性越好。滞后环的面积越大，点蚀的发展速度也越快[11]。图4为带有腐蚀产物膜的X80管线钢在0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl溶液中的循环极化曲线。可以看出，当表面存在腐蚀产物膜以后，浸泡时间从6 h延长到24 h时，$E_b$和$E_p$逐渐增加，滞后环的面积逐渐减小，表明抗点

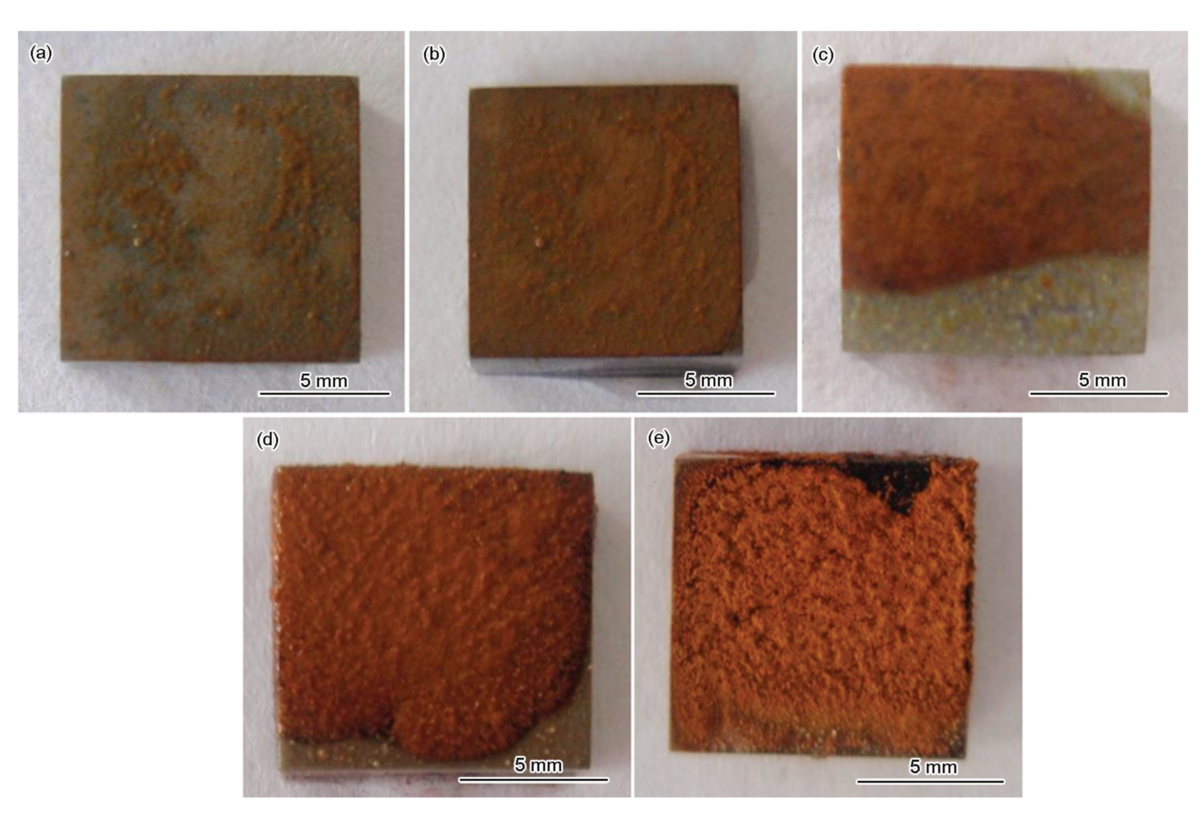
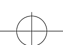



**图1** 在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡不同时间后X80管线钢表面形成的腐蚀产物膜的宏观形貌

**Fig.1** Macro-morphologies of the corrosion product films of X80 pipeline steel after immersion in Ku'erle soil simulation solution for 6 h (a), 12 h (b), 24 h (c), 96 h (d) and 168 h (e)



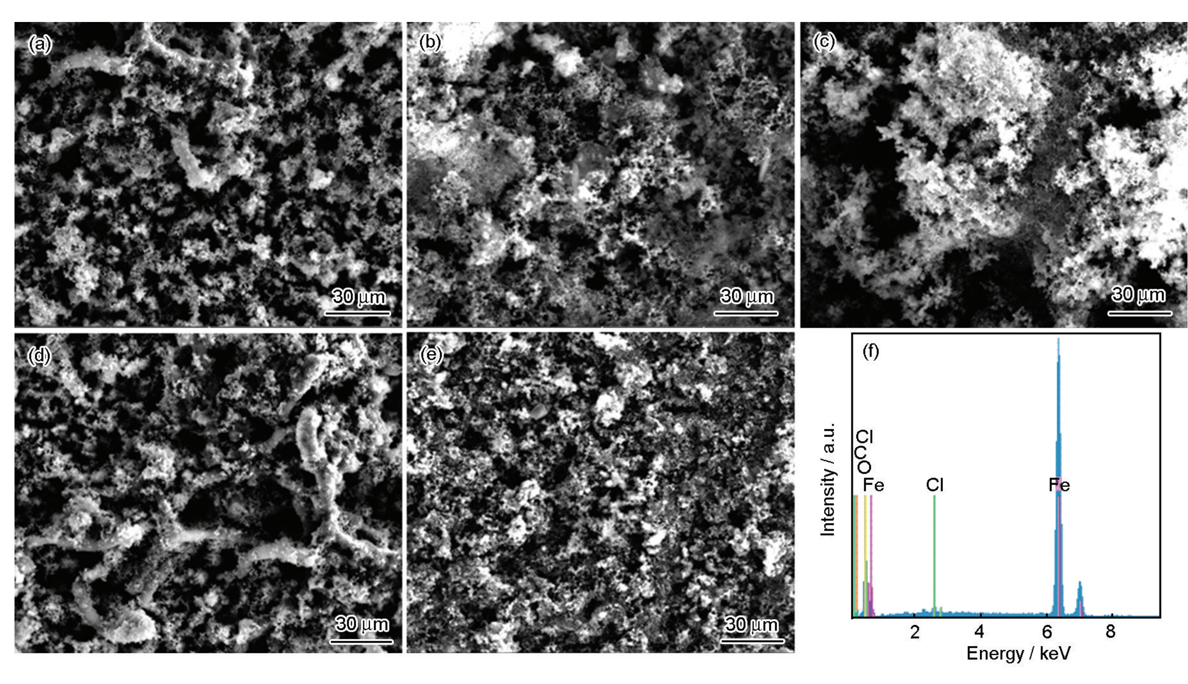



图2 在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡不同时间后X80管线钢表面形成的腐蚀产物膜的微观形貌及EDS结果

**Fig.2** Surface micromorphologies of the outer layers of corrosion product films formed on X80 pipeline steel after immersion in Ku'erle soil simulation solution for 6 h (a), 24 h (b), 96 h (c), the outer layer for 168 h (d), the inner layer for 168 h (e) and EDS result (f)

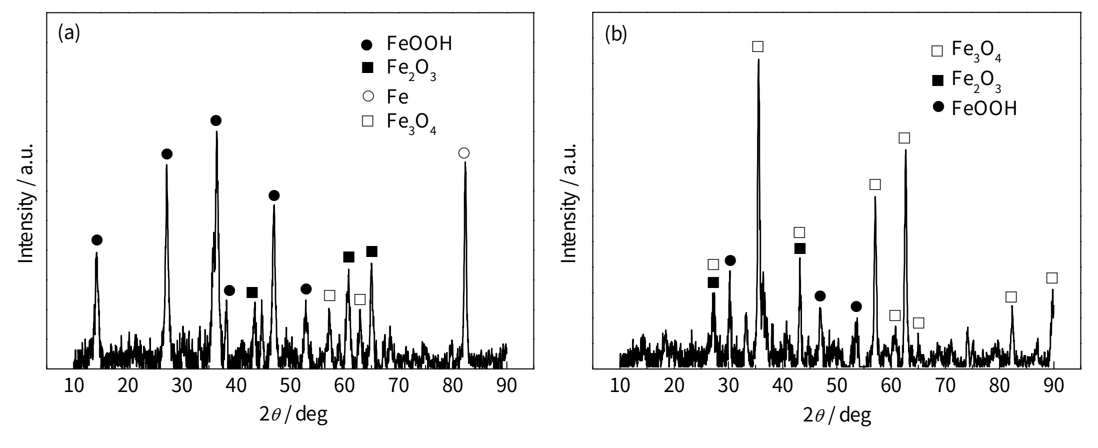



图3 在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡168 h时X80管线钢表面腐蚀产物膜的XRD谱

**Fig.3** XRD spectra of the outer layer (a) and inner layer (b) of corrosion product film formed on X80 pipeline steel after immersion in Ku'erle soil simulation solution for 168 h

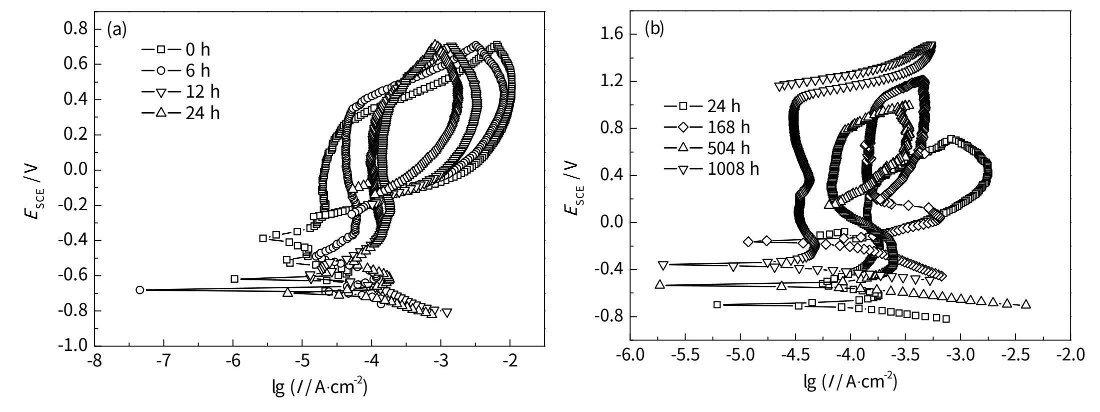
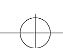



图4 带有腐蚀产物膜的X80钢在0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl溶液中的循环极化曲线

**Fig.4** Cyclic polarization curves obtained in 0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl solution for X80 pipeline steel after immersion in Ku'erle soil simulation solution for 0~24 h (a) and 24~1008 h (b)





蚀性能逐渐提高。当浸泡时间继续延长到168和504 h时，$E_b$和$E_p$仍呈增加趋势，滞后环面积仍呈现减小趋势，表明X80钢的抗点蚀性能进一步提高。当浸泡时间延长到1008 h时，循环极化曲线上则不存在滞后环，点蚀不再发生。

表1为循环极化曲线所获得的电化学参数的拟合结果。可以看出，在6~24 h的短期浸泡期间内，$E_b$和$E_p$增大幅度不大，表明此时形成的腐蚀产物膜对X80管线钢抗点蚀性能的影响相对较小，保护作用有限。当浸泡时间从24 h增大到168 h，$E_p$从−0.13 V增加到0.21 V，$E_b$从0.30 V增大到1.00 V，$E_b$和$E_p$变化明显，表明腐蚀产物膜对X80管线钢的点蚀起到了明显的抑制作用，这主要是因为此时的腐蚀产物膜增厚明显，且与腐蚀产物膜的双层结构有关。当浸泡时间进一步延长到504 h，$E_b$和$E_p$变化则不那么明显。当浸泡时间增大到1008 h以后，$E_b$继续增大到1.10 V，由于不再存在滞后环，因而不再存在$E_p$，点蚀也不再发生，腐蚀产物膜的存在使X80管线钢点蚀的敏感性大大下降。因此，腐蚀产物膜可以抑制X80管线钢的点蚀行为。

### 3.4 不同浸泡时间下的电化学阻抗曲线

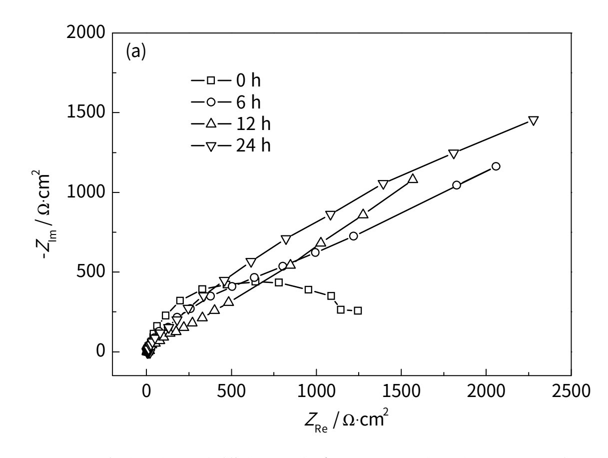
图5为经浸泡腐蚀不同时间的X80管线钢在0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl溶液中的Nyquist曲线。可以看出，当X80管线钢表面不存在腐蚀产物膜时，其Nyquist曲线表现为单一的容抗弧。当表面存在腐蚀产物膜时，Nyquist曲线则由两个容抗弧组成，且随着浸泡时间的延长，容抗弧的半径逐渐增大。

采用图6所示的等效电路图对图5的阻抗曲线进行电化学参数拟合，其中，$R_s$表示溶液电阻，$Q_{dl}$表示金属和溶液间形成的双电层电容，$R_{ct}$表示电荷转移电阻，$Q_{film}$表示腐蚀产物膜的双电层电容，$R_{film}$表示腐蚀产物膜的膜电阻。拟合结果见表2，其中，$n$用来表示腐蚀产物膜的致密性。可以看出，随着浸泡时间的延长，腐蚀产物膜的$Q_{film}$基本呈减少趋势，表明腐蚀产物膜不断增厚，$n$和$R_{film}$的数值呈增大趋势，表明膜内的缺陷数量不断减少。同时，从表2还可以看出，$R_{ct}$随着浸泡时间的延长逐渐增大，而$R_{ct}$越大，电荷转移过程越难以进行，相应的腐蚀速率也越小，表明X80管线钢表面存在的腐蚀产物膜有效

**表1 循环极化曲线的拟合结果**

**Table 1 Fitting results of cyclic polarization curves**

| Immersion time / h | Protective potential $E_p$ / V | Break potential $E_b$ / V | $S$ |
|---|---|---|---|
| 0 | −0.24 | 0.25 | 93 |
| 6 | −0.23 | 0.26 | 66 |
| 12 | −0.20 | 0.27 | 43 |
| 24 | −0.13 | 0.30 | 27 |
| 168 | +0.21 | 1.00 | 18 |
| 504 | +0.19 | 0.90 | 15 |
| 1008 | --- | 1.10 | --- |



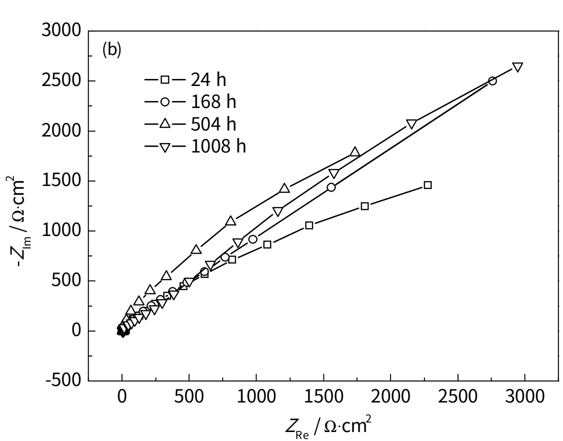




**图5** 经库尔勒土壤模拟溶液腐蚀不同时间的X80钢在0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl溶液中的Nyquist曲线

**Fig.5** Nyquist plots obtained in 0.5 mol/L $NaHCO_3$+0.01 mol/L NaCl solution for X80 pipeline steel immersed in Ku'erle soil simulation solution for 0~24 h (a) and 24~1008 h (b)

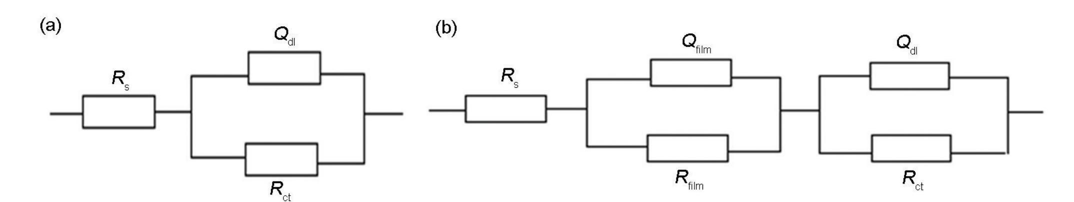



图6 电化学阻抗曲线拟合所用的等效电路图

**Fig.6** Equivalent circuit model used to fit the experimental EIS data for X80 pipeline steel without (a) and with (b) corrosion product film

**表2 电化学阻抗数据拟合的电化学参数**

**Table 2 Electrochemical parameters obtained by fitting the EIS data**

| Immersion time / h | $R_s$ Ω•cm$^2$ | $Q_{film}$ $10^{-3}$ F•cm$^{-2}$•s$^{-n}$ | $n_1$ | $R_{film}$ Ω•cm$^2$ | $Q_{dl}$ $10^{-3}$ F•cm$^{-2}$•s$^{-n}$ | $n_2$ | $R_{ct}$ Ω•cm$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 7.46 | --- | --- | --- | 0.118 | 0.883 | 1181 |
| 6 | 7.94 | 5.750 | 0.683 | 36.9 | 9.575 | 0.647 | 1491 |
| 12 | 7.77 | 1.260 | 0.706 | 98.7 | 9.139 | 0.791 | 1666 |
| 24 | 7.98 | 0.745 | 0.692 | 124.6 | 1.291 | 0.564 | 2751 |
| 168 | 8.14 | 0.420 | 0.723 | 139.2 | 1.471 | 0.759 | 3483 |
| 504 | 8.02 | 0.303 | 0.789 | 246.7 | 1.569 | 0.801 | 6141 |
| 1008 | 8.33 | 0.234 | 0.874 | 312.8 | 1.650 | 0.765 | 8141 |

地阻碍了X80管线钢的腐蚀。

### 3.5 循环极化之后的点蚀微观形貌

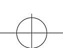
图7为循环极化曲线测试之后试样的微观形貌。可以看出，当腐蚀产物膜形成时间低于24 h时，单位面积上试样表面的点蚀坑数量和密集程度虽然呈减少趋势，但仍大量存在；当腐蚀时间达到168和504 h时，试样表面点蚀坑的数量明显减少；当浸泡时间达到1008 h时，试样表面则看不到点蚀坑。因此可以认为，腐蚀产物膜可有效地抑制点蚀坑的形成和发展，这与极化曲线所反映出的结论相一致。

### 3.6 讨论

与以前常用的管线材料 (如16Mn钢) 相比，X80管线钢里面加入了许多微量合金元素，如Mo和V等，这些元素对于提高管线钢的抗点蚀性能是有利的[12]。循环极化曲线、电化学阻抗曲线和极化之后的微观形貌观察等结果都表明，X80管线钢表面的腐蚀产物膜能够起到抑制点蚀的作用。这主要是因为：当光滑的X80管线钢在含有$Cl^-$的$NaHCO_3$溶液中腐蚀时，X80管线钢表面可形成钝化膜，钝化膜处于溶解和修复的动态过程，溶液中存在的侵蚀性$Cl^-$容易吸附在如位错、夹杂物和钝化膜薄弱部位等缺陷处[13]，钝化膜的溶解过程占主导，修复过程受到阻碍，从而容易导致X80管线钢发生点蚀。

点蚀行为包括蚀孔成核和蚀孔生长两个过程[12]。当X80管线钢表面存在腐蚀产物膜以后，腐蚀产物膜在这里主要发挥了两个作用。第一，溶液中的$Cl^-$在腐蚀产物膜表面发生了吸附，这可由图2f的EDS得到证实，吸附在产物膜表面的$Cl^-$促进了产物膜的溶解，而与X80钢基体直接接触的$Cl^-$含量减少，吸附在管线钢表面活性点和薄弱位置处的$Cl^-$数量则更少，导致蚀孔形核的机会或几率大大下降；第二，腐蚀产物膜的存在增大了蚀孔扩展的阻力，这可从阻抗谱中不断增大的电荷转移电阻得到反映。结合本实验的测试结果来看，当腐蚀时间较短时，腐蚀产物膜为单层膜且较为疏松，$Cl^-$仍然容易在腐蚀产物膜的表面发生吸附，但直接吸附在基体上的$Cl^-$含量下降，蚀孔萌生的机会很少。但由于产物膜表面较薄和致密性较差 (这可从$R_{film}$和$n$值得到反映)，且存在大量孔洞，导致$Cl^-$仍然可以穿过孔洞与基体直接接触，点蚀仍可大面积发生，对点蚀的抑制作用有限；而当腐蚀时间较长时 (超过168 h)，则形成了由内层和外层组成的双层结构产物膜，外层产物膜的作用与单层时相同，$Cl^-$仍可渗透该层到达内层，内层产物由于较为致密且牢固地结合在管线钢表面，$Cl^-$很难穿透该层渗入到基体表面，介质传输阻力大大增加，$Cl^-$与蚀孔萌生敏感位置接触的机会也因而较单层时更少，且腐蚀时间越长，腐蚀产物膜越厚、越致密，对蚀孔萌生的抑制效果也越好，最终表现为





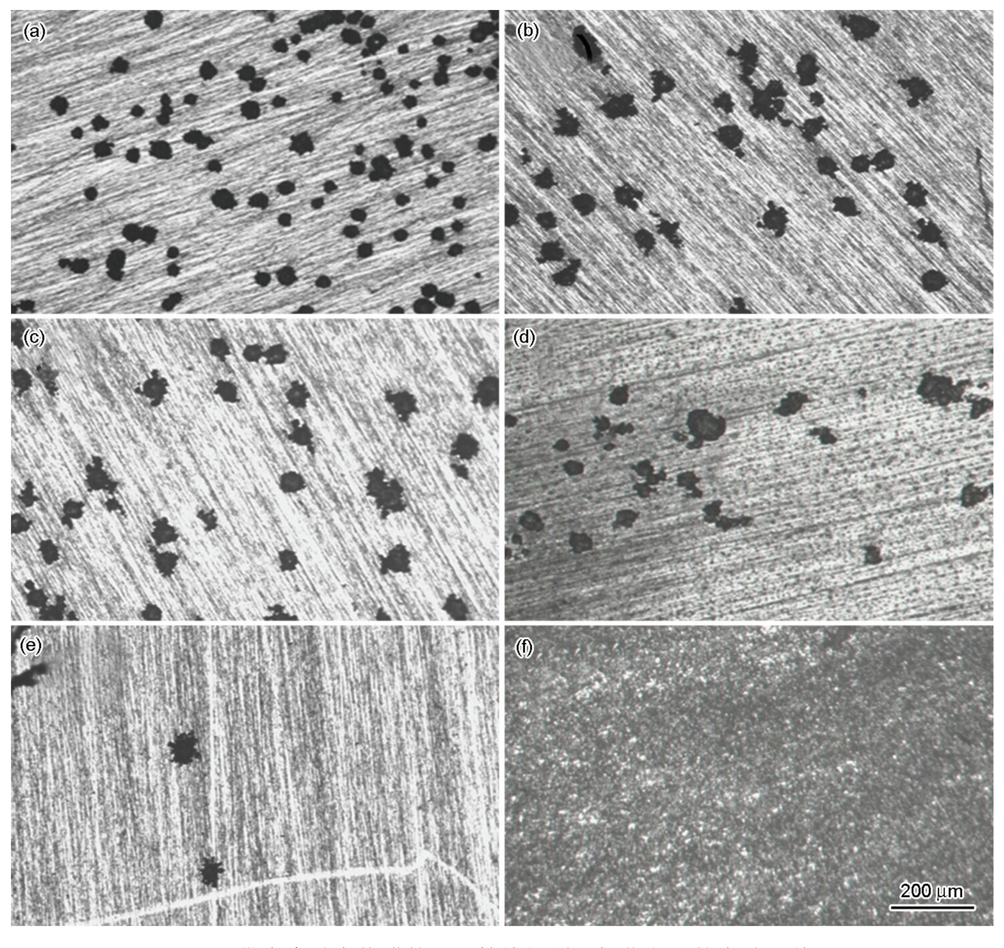



**图7** 带有腐蚀产物膜的X80管线钢循环极化之后的点蚀形貌

**Fig.7** Micrographs of pitting for X80 pipeline steel with corrosion product films for different time after cyclic polarization 0 h (a), 12 h (b) , 24 h (c), 168 h (d), 504 h (e) and 1008 h (f)

以均匀腐蚀为主。此外,腐蚀产物膜的存在,也增大了蚀孔发展的阻力,特别是致密的内层产物对蚀孔长大的阻碍作用更为明显。综上所述,表面存在的腐蚀产物膜起到了抑制蚀孔萌生和扩展的作用,降低了X80管线钢点蚀的敏感性。

## 4 结论

(1) 当X80管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡时间超过168 h时,腐蚀产物膜由内外两层组成。外层疏松多孔,缺陷较多;内层致密,缺陷较少,与X80管线钢基体结合牢固。

(2) X80管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中浸泡不同时间后形成的腐蚀产物膜都可以降低X80管线钢的点蚀敏感性,且腐蚀时间越长,腐蚀产物膜越厚、越致密,点蚀的敏感性越低;当腐蚀时间达到1008 h以后,X80管线钢则不再发生点腐蚀,而是以均匀腐蚀为主。

## 参考文献

[1] Zhang C, Cheng Y F. Synergistic effects of hydrogen and stress on corrosion of X100 pipeline steel in a near-neutral pH solution [J]. J. Mater. Eng. Perform., 2010, 19(9): 1284

[2] Zhou H, Li Q S, Zhu R C. Engineering geological characteristics of saline soil in Ku'erle area in Xinjiang [J]. West-China Explor. Eng., 2000, (3): 37
(周华, 李全胜, 朱瑞成. 新疆库尔勒地区盐渍土的工程地质特征 [J]. 西部探矿工程, 2000, (3): 37)

[3] Fu A Q, Cheng Y F. Electrochemical polarization behavior of X70 steel in thin carbonate/bicarbonate solution layers trapped under a disbonded coating and its implication on pipeline SCC [J]. Corros. Sci., 2010, 52(7): 2511

[4] Liang P, Li X G, Du C W, et al. Influence of chloride ions on the corrosion resistance of X80 pipeline steel in $NaHCO_3$ solution [J]. J. Univ. Sci. Technol. Beijing, 2008, 30(7): 735
(梁平, 李晓刚, 杜翠薇等. $Cl^-$对X80管线钢在$NaHCO_3$溶液中腐蚀性能的影响 [J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(7): 735)

[5] Esalmi A, Kania R, Worthingham B, et al. Effect of $CO_2$ and R-ratio on near-neutral pH stress corrosion cracking initiation under a disbonded coating of pipeline steel [J]. Corros. Sci., 2011, 53(6): 2318

[6] Liang P, Li X G, Du C W, et al. Stress corrosion cracking of X80 pipeline steel in simulated alkaline soil solution [J]. Mater. Des., 2009, 30(5): 1712

[7] Hu J Y, Cao S A, Xie J L. Effect of rust layer on the corrosion behavior of carbon steel in reverse osmosis product water [J]. Acta Phys.-Chim. Sin., 2012, 28(5): 1153

(胡家元, 曹顺安, 谢建丽. 锈层对海水淡化一级反渗透产水中碳钢腐蚀行为的影响 [J]. 物理化学学报, 2012, 28(5): 1153)

[8] Yang J F, Dong J H, Ke W, et al. Influence of pH values and corrosion products on low carbon steel corrosion susceptibility in borate buffer solution [J]. Acta Metall. Sin., 2011, 42(2): 152
(阳靖峰, 董俊华, 柯伟等. 硼酸缓冲溶液中pH值和腐蚀产物对低碳钢活化/钝化敏感性的影响 [J]. 金属学报, 2011, 42(2): 152)

[9] Liang P, Wang Y. Electrochemical behavior of X80 steel covered by a rust layer formed after short-term corrosion [J]. J. Chin. Soc. Corros. Prot., 2013, 33(5): 371
(梁平, 王莹. 覆有短期腐蚀产物膜的X80钢的电化学行为 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(5): 371)

[10] Yu X W, Cao C N. Evaluation of corrosion resistance of rare earth metal (REM) conversion films on LY12 alloy with cyclic anodic polarization curves [J]. Corros. Sci. Prot. Technol., 2001, 13(1): 49
(于兴文, 曹楚南. 循环阳极极化曲线评价LY12A1合金表面稀土转化膜耐腐蚀性能的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13 (1): 49)

[11] Song S Z. Methods of Corrosion Electrochemistry Research [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 1988
(宋诗哲. 腐蚀电化学研究方法 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1988)

[12] Liu D X. Corrosion and Protection of Material [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010
(刘道新. 材料的腐蚀与防护 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010)

[13] Lin Y Z, Yang D J. Corrosion and Corrosion Control Theory [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2010
(林玉珍, 杨德钧. 腐蚀和腐蚀控制原理 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2010)



